

Article, Published Version

**Fuehrer, Manfred; Pagel, Wolfgang**

## **Formparameter- und Tiefgangseinflüsse auf die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit und die Sohlströmung im allseitig begrenzten Fahrwasser (Ergebnisse der 3D-Modellierung der Schiffsumströmung nach FANKAN)**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102688>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Fuehrer, Manfred; Pagel, Wolfgang (2000): Formparameter- und Tiefgangseinflüsse auf die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit und die Sohlströmung im allseitig begrenzten Fahrwasser (Ergebnisse der 3D-Modellierung der Schiffsumströmung nach FANKAN). In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 82. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 39-50.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Formparameter- und Tiefgangseinflüsse auf die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit und die Sohlströmung im allseitig begrenzten Fahrwasser (Ergebnisse der 3D-Modellierung der Schiffsumströmung nach FANKAN)

DR. RER. NAT. MANFRED FUEHRER; BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU;

DR. RER. NAT. WOLFGANG PAGEL; WPsoft, BORGS DORF

## 1 Einführung

Physikalische Bezugsgröße für die hydraulische und fahrdynamische Charakterisierung der Fahrtzustände von Verdrängungsschiffen (Frachtschiffen) bei der Kanalfahrt ist die kritische Schiffsgeschwindigkeit (untere kritische Geschwindigkeitsgrenze). Sie beschreibt die Grenze, von der an der durch den eintauchenden Schiffskörper, den Wasserspiegelabsenkung neben dem Schiff und die dynamische Tauchung (Squat) des Schiffes eingeengte Abflussquerschnitt am Schiff nicht mehr in der Lage ist, das vom Schiff verdrängte Wasser im Fließzustand "Strömen" vollständig entgegen der Fahrtrichtung nach hinten abzuführen. Oberhalb dieser Grenze, die nach SCHUSTER [1] zunächst in Schiffsnähe lokal erreicht wird, setzt mit weiterer Steigerung der Schiffsgeschwindigkeit im kritischen Geschwindigkeitsgebiet der Kanalfahrt der instationäre Aufbau einer Stauwelle vor dem Schiff bis zum kritischen Gefälle an der oberen kritischen Schiffsgeschwindigkeit ein, das im überkritischen Schiffsgeschwindigkeitsgebiet dann die vollständige Abfuhr des verdrängten Wassers im Strömungszustand „Schießen“ ermöglicht. Der von Frachtschiffen nutzbare Schiffsgeschwindigkeitsbereich ist auf das unterkritische Geschwindigkeitsgebiet begrenzt.

Die kritische Schiffsgeschwindigkeit, auch als Stauwellengeschwindigkeit bezeichnet [1] [2], wird nach der Theorie der kurzen Bauwerke unter Vernachlässigung des Einflusses des Reibungseffektes und der Strömungsgeschwindigkeitsverteilung eindeutig aus der Grenzgeschwindigkeitsbetrachtung zum Fließwechsel im durch das Schiff "verbauten" Kanalquerschnitt in Abhängigkeit vom Querschnittsverhältnis des Kanalquerschnitts zum eintauchenden Hauptspantquerschnitt des Schiffes ( $n = A/A_M$ ) und von der Schwerebeschleunigung und der Wassertiefe unter Berücksichtigung des Kanalprofilformeinflusses hergeleitet [3].

Bei sehr kleinen Flottenwassertiefen zwischen der Kanalsohle und dem Schiffsboden versagt der Bezug auf die kritische Schiffsgeschwindigkeit als einziges Kriterium bei der Beurteilung von Fahrtzuständen. Ursachen hierfür sind das unter dem Schiff gegenüber der Betrachtung des freibleibenden Gesamtabflussquerschnitts sich früher einstellende lokale Erreichen der Grenze der Durchlassfähigkeit für die Verdrängungsströmung und das damit verbundene dynamische Tauchungsverhalten.

ten. Sie wirken als zusätzliche begrenzende Faktoren für die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit unterhalb der kritischen Schiffsgeschwindigkeit der Kanalfahrt [4].

Zur Analyse der oben genannten Beziehungen wurden in einem ersten Untersuchungsschritt auf der Grundlage der klassischen eindimensionalen Kanaltheorie und eines mit Hilfe von Modellversuchen daraus entwickelten Squat-Berechnungsverfahrens [4] [5] Grenzwertbetrachtungen zum maßgebenden Tiefgangsverhältnis angestellt, von dem an die Begrenzung der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit durch die dynamische Tauchung bestimmt wird. In einem weiteren Untersuchungsabschnitt ist unter Anwendung der von der Firma WPsoft entwickelten Fluid-Automaten-Netzmethode zur Berechnung des 3D-Zustandes der Schiffsumströmung im allseitig beschränkten Fahrwassers (FANKAN) [4] [7] [8] [9] der Einfluss des Tiefgangsverhältnisses auf die Verteilung der Verdrängungsströmung und auf das dynamische Tauchungsverhalten untersucht worden mit dem Ziel, auch für den Bereich sehr kleiner Tiefgangsverhältnisse die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit einer allgemeineren Berechnung zugänglich zu machen. Die Untersuchungen fanden im Regel-Trapez (T)-Profil bei Wassertiefen zwischen 3,0 m und 4,0 m mit einem Großmotorgüterschiff (GMS: 110 m x 11,4 m x 2,8 m) und einem verlängerten GMS (135 m x 11,4 m x 2,8 m) statt.

## 2 Lösungsweg

### 2.1 1D-Abschätzung der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit nach der Kanaltheorie

Der Fließzustand „Strömen“ der Verdrängungsströmung herrscht bis zur theoretischen unteren kritischen Geschwindigkeitsgrenze der Kanalfahrt [3] [5] [10]:

$$V_{kr} = C * \sqrt{gh_m} = C * \sqrt{gh} (1 + mh / b_r)^{-0,5} \quad (1)$$

$V_{kr}$	- Kritische Schiffsgeschwindigkeit	[m/s]
$g$	- Schwerebeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_m$	- mittlere Wassertiefe	[m]
$b_{ws}$	- Wasserspiegelbreite	[m]
$h$	- Wassertiefe	[m]
$m$	- Böschungsneigung	[-]
$b_r$	- rechnerische Kanalbreite	[m]

$C^*$  - Beiwert [-]

$$\left(C^{*2}\right)^3 + \left(C^{*2}\right)^2 6\left(1 - \frac{1}{n}\right) + C^* \left[12\left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 - 27\right] + 8\left(1 - \frac{1}{n}\right)^3 = 0$$

$n$  - Querschnittsverhältnis [-]

$$n = A / A_M$$

$A$  - Kanalquerschnitt [m<sup>2</sup>]

$A_M$  - eintauchender Hauptspantquerschnitt des Schiffes [m<sup>2</sup>]

Die Beziehung gilt für den Fall der symmetrischen Schiffsumströmung (mittige Fahrt eines Schiffes entlang der Kanalachse). Sie ist in Bild 1 in dem für den Kanalfall, d. h. in dem für die Tiefen- und Breitenbeschränkung zutreffenden Bereich des Querschnittsverhältnisses [11] ausgewertet und mit Ergebnissen von Modelluntersuchungen und Naturmessungen verglichen [3] [10]. Unter Kanalbedingungen liegt die wirtschaftliche Schiffsgeschwindigkeit bei  $0,9 V_{kr}$ . Oberhalb dieser Grenze nehmen der Schiffswiderstand und die dynamische Tauchung des Schiffes überproportional zu.

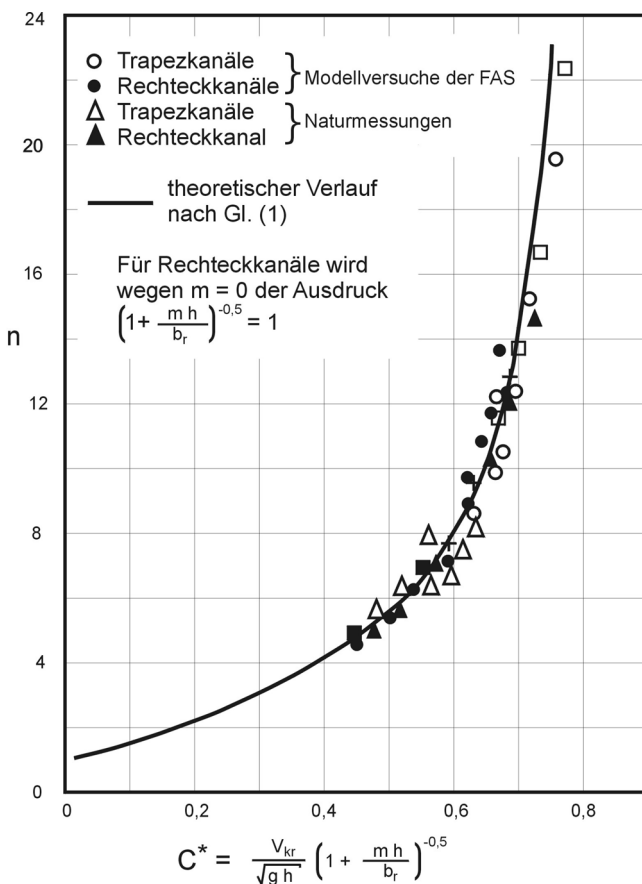


Bild 1: Kritische Schiffsgeschwindigkeit als Funktion Querschnittsverhältnis [3] [10]

Die Abschätzung des Grenzwertes der Flottwassertiefe, von der an die nach Gl. (1) berechneten kritischen Schiffsgeschwindigkeiten auf Grund des dynamischen Tauchungsverhaltens sich nicht mehr einstellen lassen, gelingt mit Hilfe des bereits zitierten Squatberechnungsverfahrens nach RÖMISCH [5] [6]. Das Verfahren ermöglicht unter Berücksichtigung der Formparameter des Schiffes – ausgehend von der Berechnung der Bug- und Heckeinsinktiefen bei der kritischen Schiffsgeschwindigkeit  $V_{kr}$  (s. Gl. (1)) – die Ermittlung des schiffsgeschwindigkeitsabhängigen Tauchungsverhaltens. Damit ist die Grenzflottwassertiefe für das Aufsitzen des Schiffes bestimmbar.

Für die Bug- und Hecktauchung gilt gemäß [5] [6] der Ansatz:

(2)

mit:

- dem Formbeiwert der Bugtauchung [-]

$$C_{F,B} = \left( \frac{10 C_B}{L/B} \right)^2$$

- dem Formbeiwert der Hecktauchung [-]

$$C_{F,H} = 1$$

- dem Geschwindigkeitsbeiwert [-]

$$C_V = 8 \left( \frac{V}{V_{kr}} \right)^2 \left[ \left( \frac{V}{V_{kr}} - 0,5 \right)^4 + 0,0625 \right]$$

und den bisher noch nicht eingeführten Bezeichnungen

$L$  - Schiffslänge [m]

$B$  - Schiffsbreite [m]

$T$  - Tiefgang [m]

$C_B$  - Blockkoeffizient des Schiffes (Verdrängungsgrad) [-]

Die Hecktauchung ist nach Gl. (2) lediglich vom Tiefgangsverhältnis  $h/T$ , die Bugtauchung zusätzlich noch vom Verdrängungsgrad  $C_B$  und dem  $L/B$ -Verhältnis abhängig. Bugtauchungsformbeiwerte  $C_{F,B} < 1$  bedeuten hecklastige,  $C_{F,B} > 1$  buglastige und  $C_{F,B} = 1$  keine Vertrimmung. Der Ansatz Gl. (2) gilt nur für im Ruhezustand ( $V = 0$ ) gleichlastig tauchende Schiffe; er darf (wie es in der Literatur z. T. erfolgt ist [11]) nicht auf im Ruhezustand bereits vertrimmte Leer- oder Ballastfahrer angewandt werden.

Die untersuchten Typschiffe GMS und das unter Beibehaltung der Bug- und Heckform verlängerte GMS (MS „Neuburg“) tauchen nach Gl. (2) hecklastig (s. Tabelle 1). Unter diesen Bedingungen ergibt sich der Grenz-

wert des Tiefgangs- und Querschnittsverhältnisses, bei dem es zum Aufsitzen des Schiffes unterhalb der kritischen Geschwindigkeitsgrenze ( $V < V_{kr}$ ) kommt, aus der Hecktauchungsrechnung  $\Delta T_{H,kr}$  als Funktion der Wassertiefe (Gl. (2) mit  $C_{F,H} = 1$ ,  $C_v = 1$ ).

L	B	$\nabla$	$C_B$	L/B	$C_{F,B}$
[m]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[-]	[-]	[-]
110	11,4	3.125,0	0,89	9,65	0,851
135		3.921,5	0,91	11,84	0,891

Tabelle 1: Bugtauchungsbeiwerte des GMS und des MS „Neuburg“

Die Auswertung dieser Beziehung ist in Bild 2 vorgenommen. Das Grenztiefgangsverhältnis für das Aufsitzen des Schiffes beträgt  $(h/T)_{gr} = 1,17$ . Es entspricht im Regel-T-Profil der Wassertiefe  $h_{gr} = 3,27$  m bzw. dem Querschnittsverhältnis  $n_{gr} = 4,18$ . Unterhalb dieses n-Wertes können die in Bild 2 angegebenen  $V_{kr}$  nicht mehr gefahren werden.

und damit die instationären Strömungsvorgänge vor der Erschöpfung der Durchlassfähigkeit des freibleibenden Abflussquerschnitts unter dem Schiff vernachlässigen. Letztere bewirken die Beschleunigung der Zunahme von  $\Delta T_H$ . Tatsächlich ist also das Aufsitzen gegenüber der Rechnung nach Gl. (2) bereits früher zu erwarten. Genauere Auskunft hierüber kann nur die 3D-Simulation der Schiffsumströmung geben.

## 2.2 3D-Untersuchung des Tiefgangs- und Formparametereinflüsse mit Hilfe des Fluid-Automaten-Netz-Programmpakets FANKAN

### 2.2.1 Modellkonzeption

Zur fahrwasserbezogenen Untersuchung stationärer Strömungszustände beim typischen Kanalfall wurde bei WPsoft das Verfahren FANKAN entwickelt und als gleichnamiges Softwarepaket implementiert. FANKAN ermöglicht die Simulation stationärer Strömungszu-

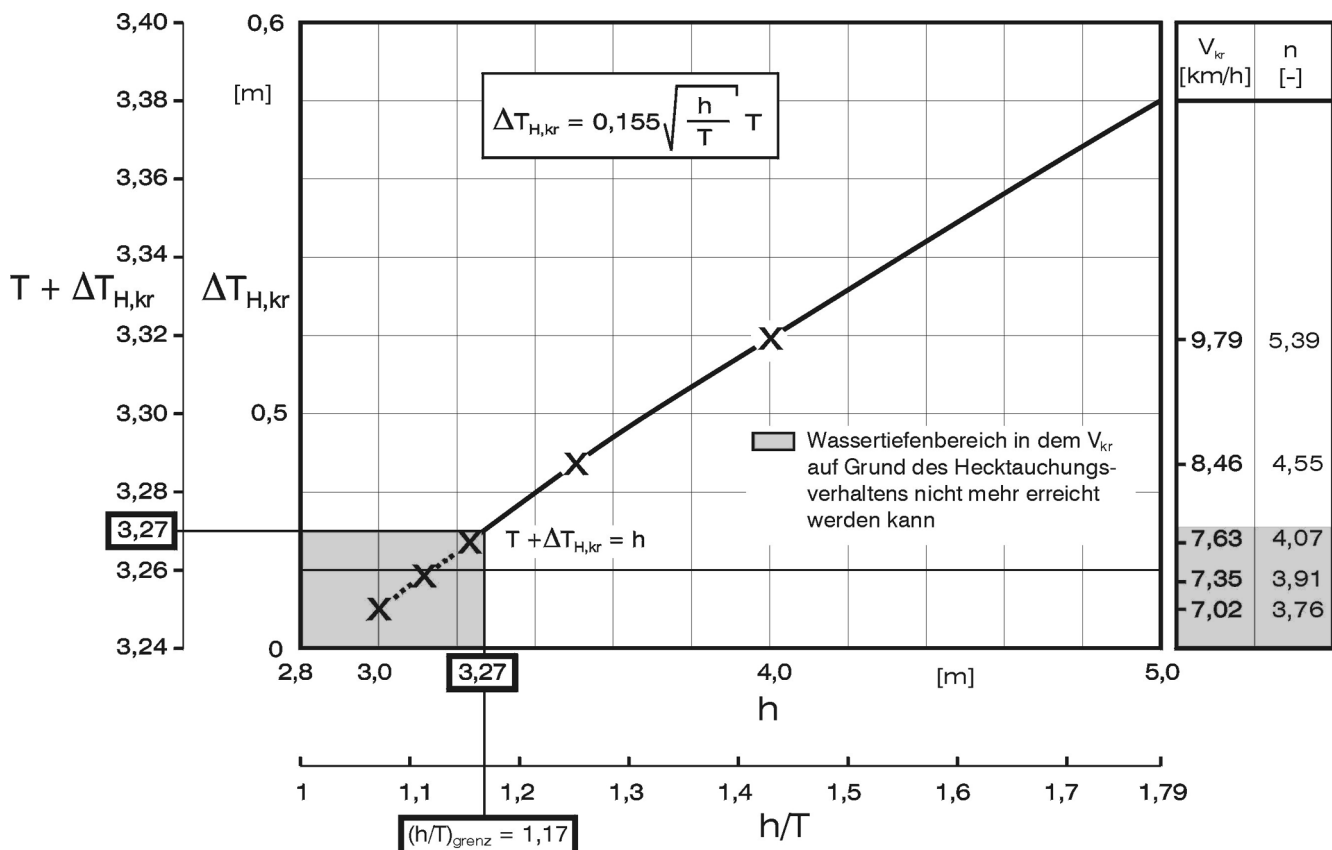


Bild 2: Wassertiefenabhängigkeit der Hecktauchung im Regel-T-Profil für  $B = 11,4$  m und  $T = 2,8$  m bei  $V_{kr}$

Auf der Grundlage der Gl. (2) lassen sich auch die bei  $h/T < 1,17$  bzw.  $n < 4,18$  erreichbaren Grenzgeschwindigkeiten  $V_{gr}$  berechnen. Sie liegen im betroffenen Wassertiefenbereich – bezogen auf  $V_{kr}$  – bei  $V_{gr}/V_{kr} = 0,85$  ( $h = 3,0$  m),  $0,927$  ( $h = 3,1$  m) und  $0,975$  ( $h = 3,2$  m). Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sie die kontinuierliche Vergrößerung von  $\Delta T_H = f(V)$  bis zum Zeitpunkt des Aufsitzens voraussetzen

stände bei der Fahrt völliger Schiffe mit unterkritischer Geschwindigkeit auf allseitig begrenztem Fahrwasser. Die Strömung um das Schiff, die Lage der freien Oberfläche sowie die globalen Größen wie Widerstand, Tauchung, Trimm können in praktisch relevanten Fällen mit vertretbarem Rechenaufwand in ausreichender Genauigkeit beschrieben werden.

Das Modell basiert auf einer unmittelbaren Diskretisierung des kontinuierlichen Strömungsvorgangs unter Umgehung der gewöhnlich zur Beschreibung hydrodynamischer Vorgänge benutzten Gleichungen. Das verwendete abstrakte mathematische Modell beruht auf einer Zerlegung des durchströmten Raumes in (endlich viele endlich große) Volumenzellen und einer Auflösung des zeitlichen Ablaufes in eine Folge endlich langer Zeitabschnitte (Takte). Diese vollständige Diskretisierung bezüglich Raum und Zeit ist in FANKAN kein Hilfsmittel zur numerischen Behandlung, sondern konstituierender Bestandteil des Modells: Der vom Modell nachgebildete Strömungsvorgang wird nicht durch Abläufe innerhalb der Volumenzellen, sondern durch Austauschvorgänge zwischen ihnen, und nicht durch das Verhalten innerhalb eines Zeitabschnittes (Taktes), sondern durch die Änderungen von Takt zu Takt beschrieben. Dabei wird idealisierend einer jeden Zelle ein einheitlicher Strömungszustand zugeordnet und vom Zeitverhalten innerhalb eines Abschnitts abstrahiert. Die mathematische Formulierung erfolgt durch ein Netz auf einer gemeinsamen Taktskala arbeitender abstrakter Automaten, die die Volumenzellen repräsentieren. Die lokalen Austauschvorgänge zwischen den Zellen werden durch Kopplungsfunktionen, die lokalen Veränderungen an den einzelnen Zellen beim Übergang von einem Zustand zum nächsten durch Übergangsfunktionen wiedergegeben. Kopplungs- und Übergangsfunktionen realisieren Abstraktionen der in realen Strömungsvorgängen im unendlich Kleinen bestehenden Beziehungen, übertragen auf die endlich großen elementaren Bausteine des Modells (Zellen, Takte). Der Umfang der nachgebildeten elementaren Mechanismen hängt von der gewünschten Beschreibungsgüte ab und hat wesentlichen Einfluss auf den Berechnungsaufwand. Stets im Funktionsumfang enthalten sind jedoch Formulierungen für die Kontinuitätsbedingung und Energieerhaltung (BERNOULLI-Gleichung).

FANKAN dient dem Auffinden und der Nachbildung stationärer Strömungszustände. Diese erscheinen im Modell (Automatennetz) als solche, bei denen sich die Austauschbeziehungen zwischen den Zellen (Automaten) auch nach Ablauf weiterer Zeittakte nicht mehr ändern. Die stationären Zustände lassen sich nicht direkt bestimmen. Sie können aber mit beliebiger Genauigkeit iterativ angenähert werden. Diese Iteration erfolgt bei FANKAN durch die taktweise Arbeit des Modells selbst. Von einem nicht stationären Anfangszustand aus bewegt sich das System durch die in ihm ablaufenden Veränderungen in einem simulierten „Anfahrvorgang“ Schritt für Schritt zu einem stationären Zustand hin. Der stationäre Zielzustand erlaubt eine sinnvolle physikalische Interpretation als stationärer Strömungszustand. In den iterativen Zwischenschritten (Takten) dorthin wird jedoch ein unphysikalisches Verhalten nicht nur zugelassen, sondern ist für den Fortgang der Iteration erforderlich. Die Abweichungen in Bezug auf Kontinuitätsbedingung und Energieerhaltung bestimmen in jedem Takt den nächsten Schritt in Richtung des diese Bezie-

hungen erfüllenden stationären Zustandes.

Zur Realisierung der taktweisen Annäherung an den stationären Zustand wird angenommen, dass jeder Zelle zusätzliche charakteristische Größen (die Zustände im engeren Sinne der Automatentheorie) derart zugeordnet sind, dass einerseits Austauschvorgänge nur dort stattfinden, wo bezüglich einer dieser Größen ein Gefälle zwischen zwei benachbarten Zellen vorhanden ist und andererseits diese Zustände selbst durch die in jedem Zeittakt erfolgenden Austauschvorgänge verändert werden. Diese zusätzlichen Größen sind anschaulich in erster Näherung als diskrete Potentiale zu deuten. Die eigentlichen physikalischen Zustandsgrößen treten bei dieser Modellierung als abgeleitete Größen auf.

Bei der Modellierung wird von einem das Schiff enthaltenden und in Kanallängsrichtung mit diesem mitbewegten endlichen Kanalstück ausgegangen. Ein positiv orientiertes kartesisches x-y-z-Koordinatensystem wird so in diesen Kontrollraum gelegt, daß die positive x-Achse parallel zur Kanallängsrichtung in Fahrtrichtung des Schiffes verläuft, die y-Achse quer zur Fahrtrichtung (von Steuerbord nach Backbord) und die z-Achse senkrecht aufwärts. Dieses Koordinatensystem wird in Längsrichtung mit dem Schiff mitbewegt, in den anderen beiden Richtungen bleibt es fest bezüglich der Fahrwasserbegrenzungen. Da ein mit dem Schiff mitbewegtes Koordinatensystem vorausgesetzt ist, wird der Kontrollraum in Richtung der negativen x-Achse durchströmt. Vor und hinter dem Kontrollraum wird eine ungestörte, homogene Strömung mit der (negativen) Schiffsgeschwindigkeit angenommen.

Durch Teilungen auf den drei Achsen wird der zunächst noch quaderförmige Kontrollraum in endlich viele quaderförmige Volumenelemente zerlegt. Durch fünf (im symmetrischen Fall, bei Rechnung im Halbraum  $y > 0$ , nur vier) ausgezeichnete Schnittebenen wird ein als nicht-durchströmt gekennzeichnete Teilquader herausgetrennt. Er stellt das Urbild für das zu modellierende Unterwasserschiff dar, das aus diesem Teilquader durch Verzerrung gewonnen wird. Auch ein nicht-rechteckiger Kanalquerschnitt wird durch Verzerrung gewonnen.

Den ausgezeichneten Schnittebenen werden, wie in Bild 3 dargestellt ist, fünf Kappen (vier im symmetrischen Fall) – Heckkappe, Bugkappe, (rechte und) linke Seite, Boden – zugeordnet. Diese sind so festgelegt, dass sie, einander überschneidend und jeweils an die Grenzen des Kontrollraumes fortgesetzt, zusammengenommen die unter Wasser liegenden Teile der Schiffshaut liefern. Auf diese Weise sind für die ausgezeichneten Trennebenen Verzerrungen definiert, die den herausgetrennten nicht-durchströmten Teilquader auf das Unterwasserschiff abbilden. In geeigneter Weise abklingend, werden die Verzerrungen auf die übrigen Schnittflächen fortgesetzt. Es ergibt sich ein Gitter, das den Kontrollraum in windschiefe quaderähnliche Sechsfächner zerlegt.

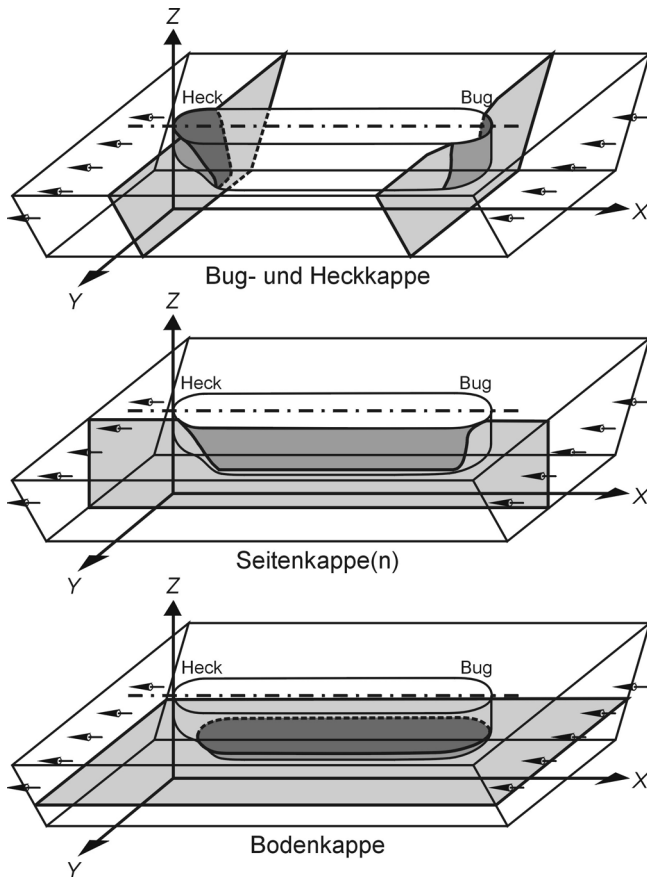


Bild 3: FANKAN-Generierung der Schiffsform durch die Kappendarstellung des Bugs- und Hecks, der Seiten sowie des Schiffsbodens

Die so vorgenommene Diskretisierung eines konkreten Kanalfalls führt zu einem Fluidautomatennetz. Für reibungsfreie Rechnungen können die Zustandsvektoren der einzelnen Automaten als Skalare angesetzt werden, die als diskretisierte Geschwindigkeitspotentiale aufgefasst werden können. Die Einbeziehung der Viskosität und der Reibungseinflüsse an den Rändern des durchströmten Gebietes (Schiffswand, Kanalsole und -böschung) in die Modellierung erfordert die Hinzunahme zusätzlicher Komponenten in die Zustandsvektoren der einzelnen Automaten. In diesen zusätzlichen Zustandskomponenten werden die aus tangentialen Geschwindigkeitsgradienten zwischen benachbarten Zellen herührenden Korrekturen für die Übergangsfunktionen kumulativ gesammelt. Auch hier werden wieder idealisierend die Vorgänge auf Beziehungen zwischen Zellen reduziert. In Abhängigkeit von den lokalen Reynoldszahlen stehen für die Reibung an den Wänden unterschiedliche Teilmodelle zur Verfügung. Verschiedene Wandrauigkeiten können berücksichtigt werden, indem (halbempirisch, nach ingenieurtechnischen Ansätzen) die Korrekturen aus den Wandschubspannungen berechnet werden.

Entsprechend dem „Bestreben“ der einzelnen Automaten im Fluidautomatennetz, den auf Grund der lokalen Zustandsgefälle stattfindenden Fluidaustausch ins

Gleichgewicht zu bringen, bilden sich im Verlaufe der taktweisen Abarbeitung scheinbare Geschwindigkeiten für die Partialmassenströme zwischen je zwei benachbarten Zellen heraus. Diese auf Grund der Diskretisierung mit Sechseckzellen maximal 6 Geschwindigkeiten von oder zu einer aktiven Zelle existieren im realen Vorgang nicht. Durch geeignete Zusammenfassung dieser Partialgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung ihrer Richtungen wird die einheitlich angesetzte Geschwindigkeit einer jeden Zelle ermittelt. Bei Vernachlässigung der Reibungseinflüsse auf das Strömungsbild ergibt sich die örtliche Druckdifferenz aus der BERNOULLI-Gleichung. Bei Modellierung mit Reibung werden die Energieverluste idealisierend in die den Wänden anliegenden Zellschichten gelegt. Die Wasseroberfläche wird durch die windschiefen Deckflächen der Zellen der obersten Schicht repräsentiert. In jedem Takt werden die neuen Soll-Höhenlagen für diese Zellen ermittelt. Bei Annäherung an die kritische Geschwindigkeit versagt dieser Modellansatz. Hier endet die Anwendbarkeit von FANKAN. Die Verschiebung der Gitterpunkte der obersten Trennfläche wird gleichmäßig auf alle übrigen Eckpunkte fortgesetzt.

An der freien Oberfläche ist außer der dynamischen Gleichgewichtsbedingung auch die kinematische Randbedingung zu berücksichtigen. Dies setzt voraus, dass die Differenz zwischen Sollwert (aus lokaler Neigung der Wasseroberfläche) und Istwert (aus den lokalen Geschwindigkeiten in den Zellen) in jedem Takt erfasst werden kann. Dies ist nur möglich bei hinreichend feinmaschigen Diskretisierungen; bei grobmaschigen Diskretisierungen verschwindet der Defekt aus Soll- und Istwert durch die Nivellierung innerhalb der Zellen. Die hydraulischen Effekte (primäre Wasserspiegelabsenkung) sind aber auch ohne dieses Modellelement ausreichend gut modellierbar, zur Erfassung des sekundären Wellensystems ist jedoch die Berücksichtigung der kinematischen Randbedingung erforderlich.

Druck- und Tangentialkräfte am Schiffskörper ergeben sich aus den Geschwindigkeits- und Druckverhältnissen in den anliegenden Zellen. Durch die Lage der freien Oberfläche ist auch das getauchte Volumen zellengenau bekannt. Damit lassen sich die resultierenden Kräfte und Momente am Schiffskörper bestimmen. Eine anteilmäßige Realisierung der Sollwerte von Tauchung und Trimm wird für den nächsten Takt bereitgestellt. Die Veränderung der Lage des Schiffsgefäßes kann von FANKAN auch dann berechnet werden, wenn dieses aus gelenkig gekoppelten Prähmen besteht. Es ist dazu allerdings erforderlich, Vorgaben zur Beweglichkeit der Gelenke zu machen, um ein realitätsnahes Verhalten zu gewährleisten.

Der üblichen FROUDEschen Vorgehensweise folgend, werden in FANKAN (tangentialer) Reibungswiderstand und Restwiderstand voneinander unabhängig ermittelt und der Gesamtwiderstand als Summe dieser beiden Anteile aufgefasst. Durch diese Zerlegung des Fahrt-

widerstandes wird die Vergleichbarkeit der Rechenergebnisse mit den Ergebnissen aus Modellversuchen gewährleistet. Für die Berechnung des grundsätzlich schwierig zu bestimmenden Restwiderstandes bieten sich mehrere Möglichkeiten an. In FANKAN wird die in dem gegenüber dem Fall festgehaltener Oberfläche (tiefgetauchtes Doppelmodell) erhöhten Potentialgefälle zwischen Bug und Heck steckende Energie ermittelt. Der Reibungswiderstand wird halb-empirisch modelliert. Für die an die Schiffshaut grenzenden Automaten wird aus der Geschwindigkeit der Zelle die lokale Tangentialgeschwindigkeit ermittelt. Mit der lokalen Lauflänge (ab Bug gerechnet) ergeben sich eine lokale Reynoldszahl und damit eine lokale tangentielle Reibungskraft. Summation der x-Komponenten über alle an der Schiffshaut anliegenden Zellen liefert den (tangentialen) Reibungswiderstand.

Das Blockablaufschema des hier in seinen Grundzügen dargestellten Verfahrens FANKAN ist aus Bild 4 ersichtlich.

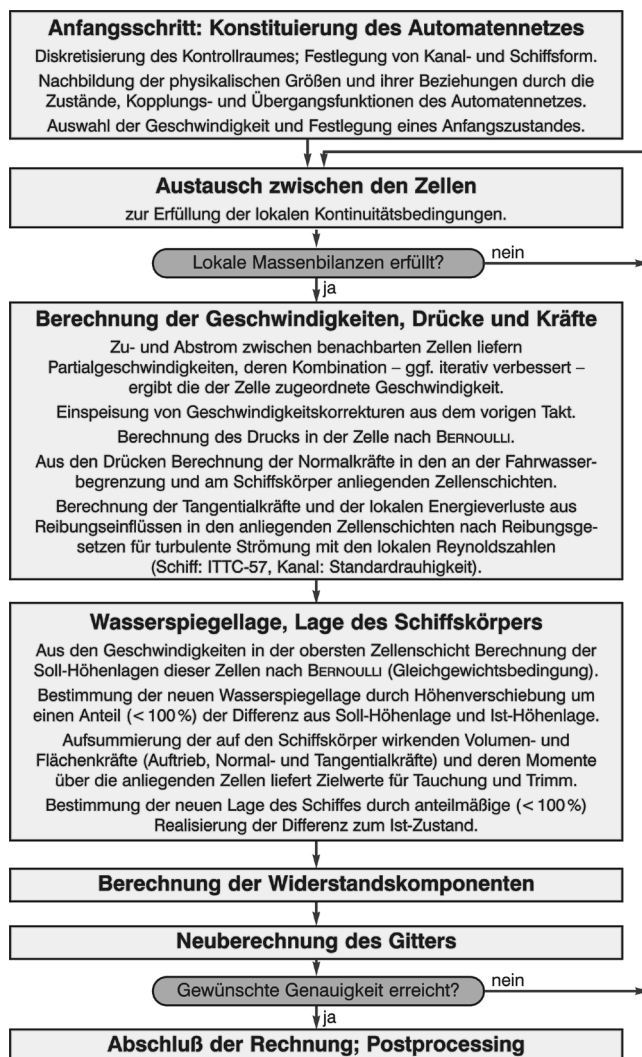


Bild 4: Blockablaufschema des Verfahrens FANKAN

## 2.2.2 Validierung von Ergebnissen des FANKAN-Simulation der Schiffsumströmung anhand von Schleppversuchsergebnissen

Zur Überprüfung der Aussagegenauigkeit des vorgestellten Modellkonzepts wurden unter Bezug auf Modellversuchsergebnisse der Untersuchung der 3D-Verteilung der Schiffsumströmung Vergleichsrechnungen mit dem Programm FANKAN angestellt. Die Modellversuche fanden im Maßstab 1 : 12,5 mit einem Finow-Maß-Schiff (40 m x 4,6 m x 1,75 m) in einem Rechteckprofil von 15 m Breite bei Wassertiefen zwischen  $h = 2,5 \dots 4,0$  m in 0,5 m-Abstufungen im unterkritischen Schiffsgeschwindigkeitsgebiet bei mittlerer Fahrt entlang der Kanalachse statt [12]. Gemessen wurden die Wasserspiegellängsschnitte in 3 bzw. 2 Abständen beiderseits des Schiffes, die zugehörigen Verläufe der Rückstromgeschwindigkeit über die Schiffslänge und den Kontrollraum vor und hinter dem Schiff in mehreren Messtiefen, die Rückstromgeschwindigkeit unter dem Schiff sowie die dynamische Tauchung und Vertrimmung des Schiffes.

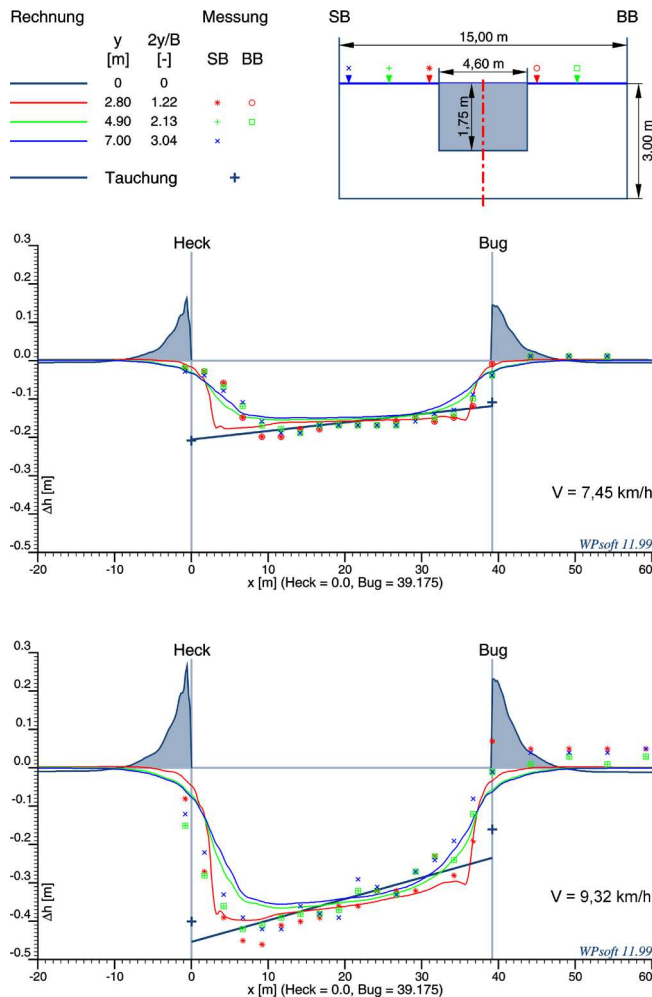
Für die Ergebnisdarstellung der FANKAN-Simulation erfolgte die Vorgabe der „Messspuren“ des Modellversuchsprogramms, so daß ein unmittelbarer Vergleich von Berechnungs- und Versuchsergebnissen (in nach dem FROUDEschen Ähnlichkeitsgesetz übertragenen Naturwerten) ermöglicht worden ist.

Die auf diesem Wege gewonnenen umfangreichen Ergebnisse der Validierung können im Folgenden in Form charakteristischer Beispiele behandelt werden.

Der Vergleich der Wasserspiegellängsschnitte in Bild 5 zeigt im Bereich der gleichmäßigen muldenförmigen Ausbildung der Wasserspiegelabsenkung neben dem Schiff gute Übereinstimmung zwischen der FANKAN-Rechnung (ausgezogene Längsschnitte in der eingetragenen lokalen Zuordnung) und den Messwerten (eingetragene Messpunkte). Mit steigender Schiffsgeschwindigkeit entsteht zum Heck hin eine dreieckige Längsschnittform des Wasserspiegelverlaufs. Nach den unteren Längsschnitten in Bild 5 wird das nach den Messergebnissen sich ausbildende lokale Absinkmaximum unmittelbar neben dem Schiff durch die Rechnung nicht realisiert. Das Gleiche gilt auch für die bei höheren Wassertiefen und größeren Schiffsgeschwindigkeiten durch Sekundärwellenüberlagerung sich einstellende Welligkeit der Wasserspiegellage.

Der nach FANKAN berechnete hier nicht mit einem Beispiel dargestellte Verlauf der Rückstromgeschwindigkeit an den einzelnen Messstellen des freibleibenden Kanalquerschnitts am Schiff bildet bei Schiffsgeschwindigkeiten mit gleichmäßiger Absinkmulde die gemessene Situation befriedigend wieder. Bei größeren Schiffsgeschwindigkeiten treten – insbesondere bei



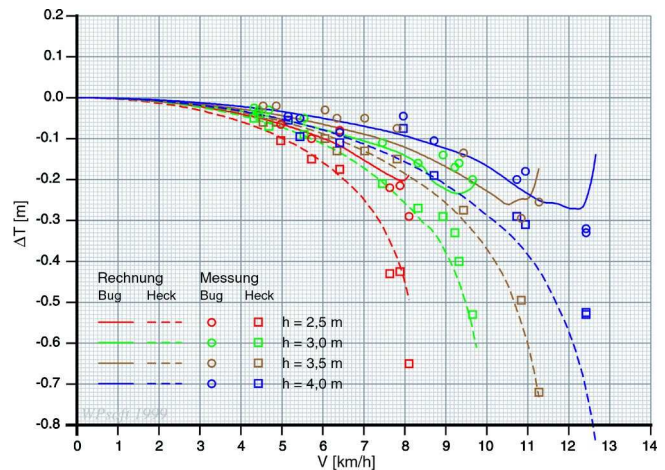


**Bild 5:** Vergleich gemessener Wasserspiegellängsschnitte neben dem Schiff sowie der Trimm- und Tauchungslagen mit Berechnungsergebnissen der FANKAN-Simulation bei der mittigen Fahrt eines Finow-Maß-Schiffes (40 m x 4,6 m x 1,75 m) in einem 15 m breiten Rechteckkanal bei 3,0 m Wassertiefe

den größeren Wassertiefen - höhere Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Rückstromgeschwindigkeiten sowie in den Geschwindigkeitsanstiegs- bzw. -abnahmezonen am Vor- und Hinterschiff auf.

Der in Bild 6 für alle untersuchten Wassertiefen durchgeführte Vergleich der berechneten und gemessenen dynamischen Bug- und Hecktauchungen zeigt eine gute Abbildung der realen Verhältnisse durch die FANKAN-Simulation. Größere Streuungen der Messwerte mit Abweichungen von den berechneten  $\Delta T_B$  und  $\Delta T_H$  treten z. T. bei den Wassertiefen  $h = 3,0$  m und  $h = 4,0$  m im Übergangsbereich zur kritischen Schiffsgeschwindigkeit auf.

Die grundsätzlich richtige Wiedergabe der hydraulischen Verhältnisse durch FANKAN bestätigt den Ansatz für die Nachbildung der physikalischen Größen und Bezie-



**Bild 6:** Vergleich gemessener dynamischer Tauchungen eines Finow-Maß-Schiffes (40 m x 4,6 m x 1,75 m) in einem 15 m breiten Rechteckprofil bei variabler Wassertiefe mit Berechnungsergebnissen der FANKAN-Simulation

hungen im Modell und die Wirksamkeit der implementierten Algorithmen. Die zu Tage tretenden Abweichungen geben Aufschluss über die mit der für die Rechnungen gewählten Diskretisierung erreichbaren Abbildungsgüte des Modells. In erster Näherung kann die für eine FANKAN-Rechnung eingesetzte Diskretisierung von Schiff und Kanalstück durch die mittleren Kantenlängen der Zellen in den drei Grundrichtungen charakterisiert werden, etwas genauer durch die Kantenlängen in hydrodynamisch kritischen Bereichen. Kleinräumig zu beschreibende Erscheinungen (Sekundärwellensystem, lokale Absunkspitzen) benötigen Kantenlängen, die klein gegenüber der Ausdehnung dieser Erscheinungen sind. Die Kantenlängen der Zellen haben aber wegen des dreidimensionalen Ansatzes einen näherungsweise mit dem Exponenten 3 behafteten Einfluss auf die Rechenzeit. Je nach Modellierungsziel kann ein geeigneter Kompromiss zwischen Beschreibungsgüte und Rechenzeit gefunden werden. Für die Validierungsrechnungen mit dem Typschiff AMANDA wurde eine Diskretisierung gewählt, die für weite Geschwindigkeitsbereiche akzeptable Zellengrößen bei für derartige Serienrechnungen noch vertretbarem Rechenaufwand herstellt (mittlere Kantenlänge in x-Richtung z. B. etwa 2 m, Kantenlänge in kritischen Bereichen etwa 0,3 m). Die oben benannten Abweichungen zwischen Messung und Rechnung zeigen die Grenzen dieses Kompromisses.

### 3 Tiefgangs- und Formparameter-effekte im Regel-T-Profil

Die 3D-Simulation der Schiffsumströmung des GMS und des MS „Neuburg“ im Regel-T-Profil mit dem Programm FANKAN wurde in dem erfassten Wassertiefenbereich  $h/T > 1,17$  jeweils für die Schiffgeschwindigkeitsstufen von 40, 60, 70, 80, 90, 95 und 98 % von  $V_{kr}$  nach Gl. (1) durchgeführt. Grund für den Abbruch der Rechnungen bei  $V/V_{kr} = 0,98$  ist die oberhalb dieses Grenzwertes im



Übergangsbereich zum kritischen Geschwindigkeitsgebiet einsetzende Instabilität des Modells (s. Abschnitt 2.2).

Bei Tiefgangsverhältnissen  $h/T < 1,17$  war die erreichbare höchste Schiffsgeschwindigkeit  $V_{gr} < 0,98 V_{kr}$  unbekannt. Sie musste bei der Simulation durch iterative Annäherung mit sehr kleinen Änderungen von  $V$  bestimmt werden.

Die zur Abnahmecharakteristik von  $V_{gr}$  mit sich verringerndem Tiefgangsverhältnis erhaltenen Ergebnisse zeigt die Tabelle 2. Neben den  $V_{kr}$ -Werten nach Gl. (1) und den  $V_{gr}$ -Werten sind in der Zusammenstellung unter Bezug die in den Bildern 7 und 8 dargestellten schiffsgeschwindigkeitsabhängigen Tauchungsfunktionen  $\Delta T_{B,H} = f(V)$  der FANKAN-Simulation auch die  $V_{gr}$  jeweils zugehörigen Bug- und Hecktauchungswerte angeben.

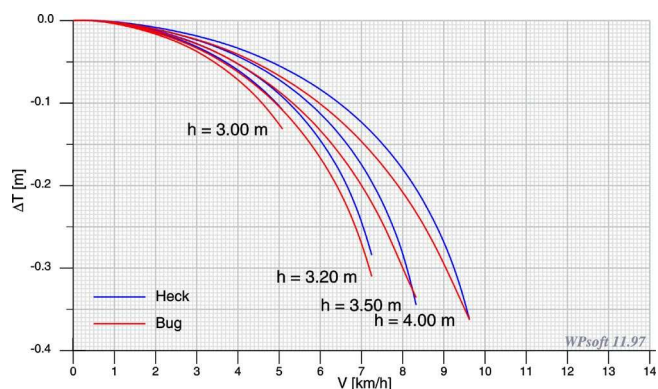


Bild 7: Dynamische Tauchung eines GMS (110 m x 11,4 m x 2,8 m) bei variabler Wassertiefe im Regel-T-Profil (FANKAN-Simulation)

L [m]			110				135			
h	h/T	$V_{kr}$	$V_{gr}$	$V_{gr}/V_{kr}$	$\Delta T_B$	$\Delta T_H$	$V_{gr}$	$V_{gr}/V_{kr}$	$\Delta T_B$	$\Delta T_H$
[m]	[-]	[km/h]	[km/h]	[-]	[m]	[m]	[km/h]	[-]	[m]	[m]
3,0	1,07	7,02	5,08	0,724	0,131	0,108	5,30	0,755	0,138	0,123
3,1	1,11	7,35	6,32	0,860	0,220	0,189	6,47	0,880	0,219	0,209
3,2	1,14	7,63	7,35	0,950	0,310	0,284	7,41	0,971	0,286	0,325
3,5	1,25	8,33	8,33	0,98*	0,336	0,344	8,03	0,98*	0,314	0,351
4,0	1,43	9,63	9,63	0,98*	0,363	0,363	9,63	0,98*	0,346	0,371

Tabelle 2: Erreichbare Schiffsgeschwindigkeiten eines GMS und des MS „Neuburg“ als Funktion des Tiefgangsverhältnisses nach den Ergebnissen der FANKAN-Simulation

Nach den vorliegenden Ergebnissen sinkt die erreichbare höchste Schiffsgeschwindigkeit bei sehr kleinen Tiefgangsverhältnissen schnell unter die kritische Schiffsgeschwindigkeit der Kanalfahrt ab. Dabei bestehen geringe Unterschiede zwischen dem 110 m langen und dem 135 m langen Schiff. Bei gleichem Tiefgangsverhältnis können mit dem längeren Schiff etwas höhere Geschwindigkeiten  $V_{gr}$  gefahren werden; die größere Schiffslänge „läuft“ etwas besser.

Das dynamische Tauchungsverhalten beider Schiffe wird gemäß Bild 7 und 8 im untersuchten Schiffsgeschwindigkeitsbereich nach der 3D-Simulation durch eine schwache, beim GMS etwas stärker ausgeprägte buglastigen Vertrimmung ( $\Delta T_B - \Delta T_H \leq 0,03$  m) charakterisiert. Der Übergang zu der in Tabelle 2 erfassten hecklastigen Vertrimmung bei den größeren Wassertiefen ist auf den in der Tauchungsfunktion  $\Delta T_B = f(V)$  theoretisch nachvollzogenen Beginn des Austauschens des Bugs bei der Annäherung von  $V$  an  $V_{kr}$  [5] zurückzuführen.

Abweichend von den vorstehenden Ergebnissen setzt die Anwendung der Gl. (2) bei der eindimensionalen Tauchungsberechnung nach Tabelle 1 die hecklastige

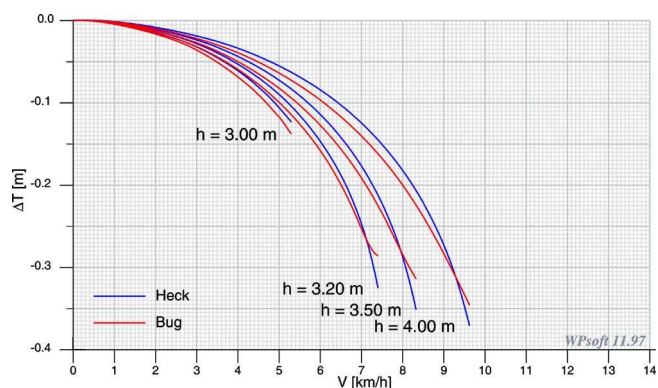


Bild 8: Dynamische Tauchung des MS "Neuburg" (135 m x 11,4 m x 2,8 m) bei variabler Wassertiefe im Regel-T-Profil (FANKAN-Simulation)

Vertrimmung beider Schiffe im unterkritischen Schiffsgeschwindigkeitsgebiet voraus. In [4] angestellte Vergleichsrechnungen zeigen für das GMS bei hecklastiger Vertrimmung in der Größenordnung der Buglastigkeit der 3D-Simulationsergebnisse im Geschwindigkeitsbereich bis  $V_{gr} = 0,85 \dots 0,90 V_{kr}$  übereinstimmende mittlere Tauchungswerte. Mit weiterer Annäherung

an  $V_{kr}$  wächst die Hecktauchung nach Gl. (2) schneller. Für das 135 m-Schiff werden aus der 1D-Rechnung deutlich kleinere Bugtauchungen als in den Bildern 7 und 8 erhalten. Offensichtlich kommt es hier mit der Erfassung der Formeigenschaften in Gl. (2) über  $C_{F,B} = f(C_B; L/B)$  zur Überzeichnung der Vertrimmung des MS „Neuburg“, was auf die Notwendigkeit der Präzisierung des Beiwertes im Hinblick auf den Flottwassertiefeneinfluss hinweist.

Unter Zugrundelegung der in Tabelle 2 grau hinterlegten Maximalbeträge der Bug- und Hecktauchung  $\Delta T_{max}$  wurde in Tabelle 3 das Flottwassertiefenflächenverhältnis  $\alpha_{FI} = (h - (T + \Delta T_{max})) / (h - T)$  bezogen auf den Flottwassertiefe bei  $V = 0$  gebildet. Es gibt Auskunft über die Grenze des freibleibenden Abflussquerschnitts unter dem Schiff, von dem an nach den Aussagen der FANKAN-Simulation keine weitere Abflusssteigerung in diesem Bereich mit steigendem  $V$  mehr möglich ist und der instationäre Prozess des Aufsitzens der Schiffe beginnt (s. Abschnitt 2.1). Diese Restabflussquerschnittsöffnung nimmt mit abnehmender Wassertiefe zu, d. h., die Grenze der „Schluckfähigkeit“ des freibleibenden Abflussquerschnitts unter dem Schiff ist bei kleinen Wassertiefen lokal früher erschöpft. Es besteht weiter ein deutlicher Schiffslängeneinfluss. Bei dem längeren Schiff ist danach bei vergleichbaren Wassertiefen  $\alpha_{FI}$  durchgehend kleiner als beim GMS.

L [m]	110			135		
h [m]	3,0	3,1	3,2	3,0	3,1	3,2
$\alpha_{FI}$ [-]	0,35	0,27	0,23	0,31	0,27	0,19

Tabelle 3: Restabflussquerschnittsöffnung unter dem Schiff bei  $V_{gr} (< 0,98 V_{kr})$

Die den obigen Vorgängen zu Grunde liegenden flottwassertiefen- und schiffslängenabhängigen signifikanten Veränderungen des 3D-Zustandes der Schiffströmung wurden in [4] analysiert.

In den Bildern 9 und 10 sind hierzu die schiffsgeschwindigkeitsabhängigen Funktionen der mittleren maximalen Absunks  $\Delta h = f(V)$  dargestellt und die querschnittsgemittelten maximalen Rückstromgeschwindigkeit  $V_R = f(V)$  im engsten Abflussquerschnitt sowie der querschnittsgemittelten Rückstromgeschwindigkeit  $V_{R,B} = f(V)$  im Teilabflussquerschnitt unter dem Schiffsboden jeweils für beide Schiffe miteinander verglichen. Die Beziehungen  $V_R = f(V)$  und  $\Delta h = f(V)$  in Bild 9 und 10 sind für das GMS und das längere MS „Neuburg“ deckungsgleich. Sie werden auch für  $V = V_{gr}$  durch entsprechende Rechnungen nach der eindimensionalen Kanaltheorie [1] abgebildet [4]. Im Teilabflussquerschnitt unter dem Schiff liegen die Rückstromgeschwindigkeiten  $V_{R,B} = f(V)$  nach den Ergebnissen der 3D-Simulation grundsätzlich über den gesamtquerschnittsgemittelten Funktionen  $V_R = f(V)$ . Mit abnehmender Wassertiefe vergrößert sich der Anstieg von  $V_{R,B} = f(V)$ . Zwischen

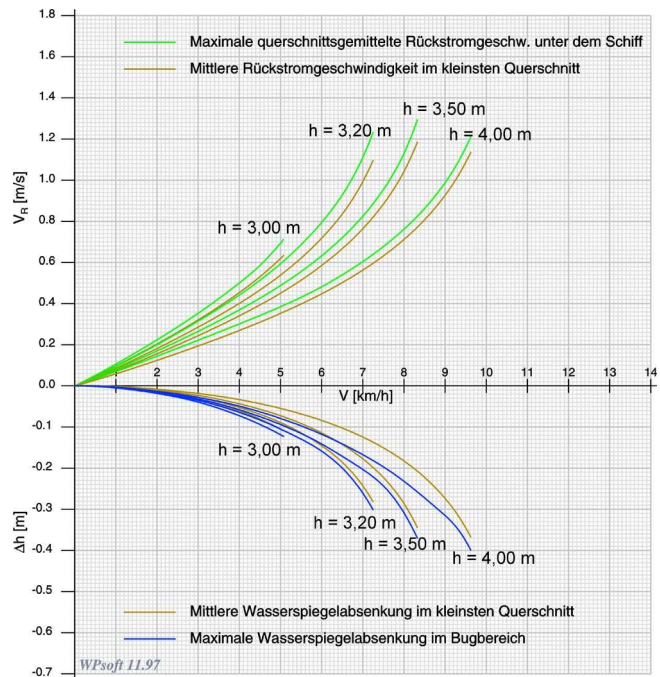


Bild 9: Rückstromgeschwindigkeit und Wasserspiegelabsenkung neben einem GMS (110 m x 11,4 m x 2,8 m) im Regel-T-Profil (FANKAN-Simulation)

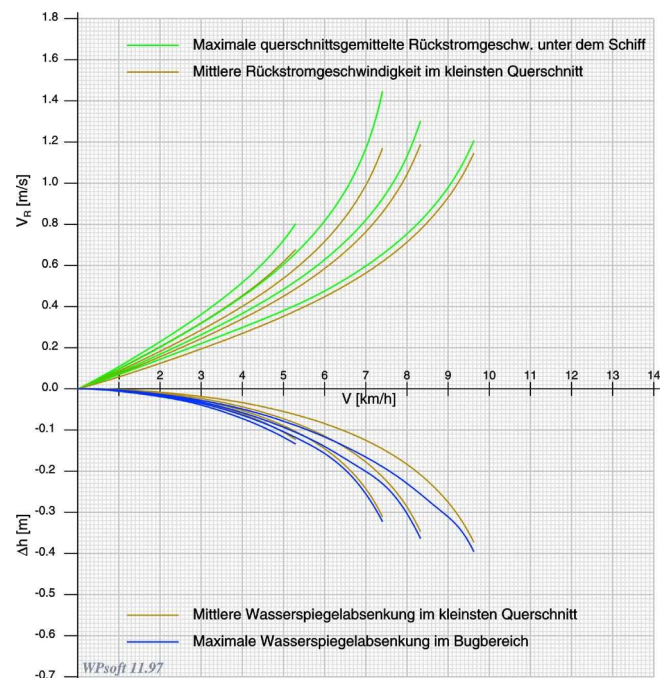


Bild 10: Rückstromgeschwindigkeit und Wasserspiegelabsenkung neben dem MS „Neuburg“ (135 m x 11,4 m x 2,8 m) bei variabler Wassertiefe im Regel-T-Profil (FANKAN-Simulation)

beiden Schiffslängen bestehen bis zur Wassertiefe  $h \geq 3,5$  m nach Bild 9 und 10 keine Unterschiede im Funktionsverlauf von  $V_{R,B} = f(V)$ . Bei Unterschreitung dieser Grenze wird mit dem stärkeren Anwachsen der  $V_{R,B}$ -Werte des MS „Neuburg“ (Bild 10) gegenüber den Rück-



stromgeschwindigkeiten unter dem GMS (Bild 9) die Beeinflussung des örtlichen Rückstromregimes durch die Schiffslänge ausgewiesen.

Einen genaueren Überblick über die Abflusssituation unter dem Schiff und ihre Abhängigkeit von der Flottwassertiefe liefert die Berechnung des Verhältnisses des tatsächlichen Abflusses der Verdrängungsströmung unter dem Schiff zum Zustrom über die Schiffsbreite und Wassertiefe. Unter Berücksichtigung der Querschnittseinengung durch die dynamische Tauchung gilt [4] [12]:

$$\alpha_Q = \frac{V + V_{R,B_x}}{V} \frac{h - (T + \Delta T_x)}{h} \quad (3)$$

mit den bisher noch nicht eingeführten Bezeichnungen:

$\alpha_Q$	-	Abflussverhältnis	[-]
$V_{R,B_x}$	-	querschnittsgemittelte Rückstromgeschwindigkeit an der Stelle $0 \leq x \leq L$ unter dem Schiff	[m/s]
$\Delta T_x$	-	dynamische Tauchung des Schiffes an der Stelle $0 \leq x \leq L$	[m]

Das Abflussverhältnis kann für jeden freibleibenden Abflussquerschnitt über die Schiffslänge  $\alpha_Q = f(L)$  für jeweils  $V = \text{const.}$  als Längenverteilung und schiffsgeschwindigkeitsabhängig für den Querschnitt des maximalen lokalen Schiffsunterströmung  $\alpha_Q = f(V)$  ausgewertet werden.

Im Regel-T-Profil bestehen nach den Ergebnissen der FANKAN-Simulation für das GMS und das MS „Neuburg“ die aus Bild 11 ersichtlichen schiffsgeschwindigkeits- und wassertiefenabhängigen Zusammenhänge. Der Anteil der unter dem Schiff abfließenden Verdrängungsströmung nimmt mit sinkender Flottwassertiefe von  $0,37 \leq \alpha_Q \leq 0,30$  im Schiffsgeschwindigkeitsbereich  $0,40 \leq V/V_{kr} \leq 0,98$  bei  $h = 4,0$  m auf  $0,08 \leq \alpha_Q \leq 0,035$  im Schiffsgeschwindigkeitsbereich  $0,40 \leq V/V_{kr} \leq 0,75$  bei  $h = 3,0$  m ab. Es tritt somit eine erhebliche Verringerung des relativen Schiffsunterströmung mit abnehmender Wassertiefe ein. Während zwischen den Schiffslängen  $L = 135$  m und  $L = 110$  m bei den größeren Wassertiefen in Bild 11 keine Unterschiede erkennbar sind, lässt die größere Schiffslänge bei geringen Wassertiefen kleinere spezifische Teilabflüsse unter dem Schiff, verbunden mit kleineren Restabflussquerschnittsöffnungen (s. Tabelle 3) zu, ohne dass es bereits zur Grundberührung kommt.

Die abnehmende Durchlassfähigkeit des Abflussquerschnitts unter dem Schiff mit sinkender Wassertiefe führt nach der Analyse der Sohlgeschwindigkeitsvektorfelder in [4] – bei grundsätzlich schlankerem Anströmung des längeren Schiffes – zur verstärkten Ausbildung von Querkomponenten der Rückströmung vor allem im Bugbereich, aber auch im Heckbereich. Unter dem Vorschiff

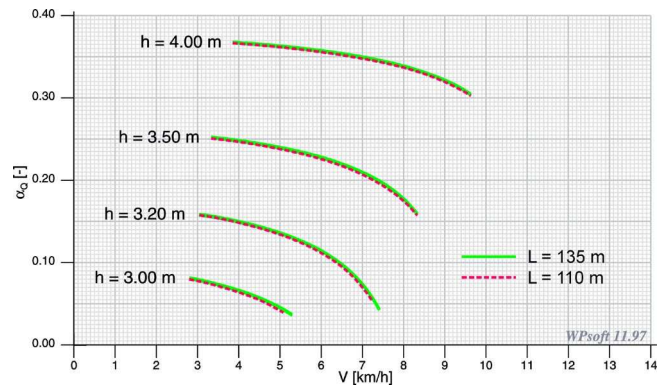


Bild 11: Abflussverhältnis der Verdrängungsströmung unter dem Schiff zum Zustrom über die Schiffsbreite und Wassertiefe für das GMS und das MS „Neuburg“ bei variabler Wassertiefe im Regel-T-Profil (FANKAN-Simulation)

werden Strömungsrichtungsauslenkungen bis zu ca.  $80^\circ$  erreicht. Gleichzeitig verlängert sich auf Grund dieser Entwicklung die Anströmungszone bis zum Übergang in den schiffsachsenparallelen Rückstromverlauf bei der kleinsten erfassten Wassertiefe auf etwa ein Drittel der Schiffslänge. Die Absolutbeträge der Querströmungskomponenten nehmen bei kleinen Wassertiefen infolge des Absinkens der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten unter die kritische Schiffsgeschwindigkeit ab.

Auf der Basis der in Tabelle 2 zusammengefassten Ergebnisse der FANKAN-Simulation können zur praktischen Beurteilung der Auswirkungen extremer Flottwassertiefenbeschränkungen die Einschränkungen der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit  $V_{gr} < V_{kr}$  durch die Erweiterung der Gl. (1) in folgender Form erfasst werden:

$$V_{gr} = C_{h/T} C^* \sqrt{gh} (1 + mh/b_r)^{-0,5} \quad (4)$$

Der Beiwert  $C_{h/T} = V_{gr}/V_{kr}$  gilt im Bereich  $h/T \leq (h/T)_{gr}$  und ist hier eine Funktion des Tiefgangsverhältnisses. Aus der Darstellung der Berechnungsergebnisse von  $C_{h/T} = f(h/T)$  in Bild 12 ist der eindeutige Schiffslängeneinfluss ersichtlich. Die Schnittstellen mit  $V_{gr}/V_{kr} = 1$  liegen für das 135 m lange MS „Neuburg“ bei  $h/T = 1,16$  und für das 110 m lange GMS bei  $h/T = 1,17$ . Sie stimmen mit den Aussagen der 1D-Abschätzung gut überein.

Für die Lösung praktischer Aufgaben der Squatbeurteilung bewegt sich der in Bild 8 ausgewiesene Schiffslängeneinfluss im Rahmen der Rechengenauigkeit. Deswegen ist der Ausgleich durch eine  $C_{h/T}$ -Funktion zweckmäßig. Es ergibt für die Abnahme der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit bezogen auf  $V_{kr}$  die Beziehung:

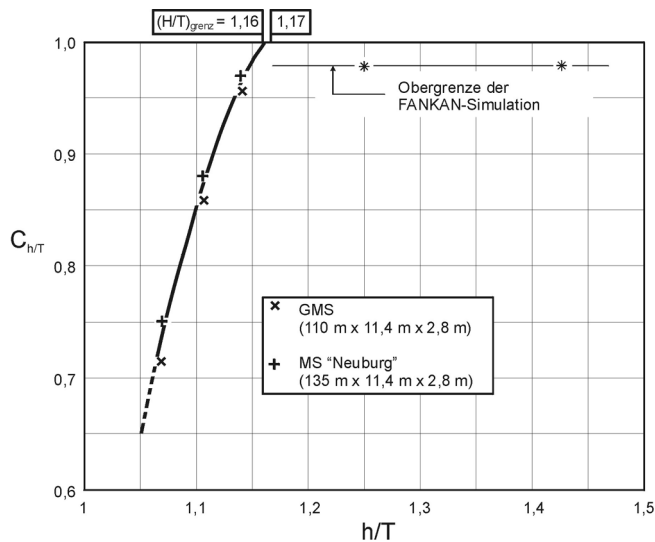


Bild 12: Erreichbare Schiffsgeschwindigkeit  $C_{h/T} = V_{gr}/V_{kr}$  im Regel-T-Profil in Abhängigkeit vom Tiefgangs-verhältnis nach den Ergebnissen der FANKAN-Simulation der Schiffsumströmung

$$C_{h/T} = V_{gr}/V_{kr} = -21,44 + 37,24(h/T) - 15,43(h/T)^2 \quad (5)$$

Als Grenztiefgangsverhältnis folgt daraus  $(h/T)_{gr} = 1,16$ ; das entspricht bei dem Tiefgang  $T = 2,8$  m der Wassertiefe  $h_{gr} = 3,25$  m. Der Ansatz gilt im Bereich  $1,05 < h/T = 1,16$ .

Gemäß Gl. (4) werden im Regel-T-Profil bei den Wassertiefen  $h = 3,0$  m;  $3,1$  m und  $3,2$  m Absolutbeträge des Verhältnisses von  $V_{gr}/V_{kr}$  von  $5,2/7,0$  km/h,  $6,4/7,4$  km/h bzw.  $7,6/7,4$  km/h erhalten. Die häufig als zulässige Untergrenze angesetzte Flottwassertiefe von  $h-T = 0,2$  m bewirkt hiernach bereits die tauchungsbedingte gravierende Reduzierung der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit herunter bis an die untere Grenze der nach den gültigen Bemessungsrichtlinien [13] zum Erhalt der Steuerfähigkeit notwendigen Manövriergeschwindigkeit von  $5,0$  km/h.

#### 4 Schlussfolgerungen

Das dynamische Tauchungsverhalten (Squat) von Schiffen stellt bei kleinen Flottwassertiefen das entscheidende Kriterium für die Begrenzung der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit dar. Es läßt bei Tiefgangsverhältnissen  $h/T < 1,16 \dots 1,17$  im Regel-T-Profil nicht mehr die volle Nutzung des durch die kritische Schiffsgeschwindigkeit hydraulisch definierten Schiffsgeschwindigkeitsbereichs von Verdrängungsschiffen (Frachtschiffen) zu, da die Schiffe bereits früher aufsitzen.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der 3D-Simulation der Schiffsumströmung eines GMS ( $110$  m x  $11,4$  m x  $2,8$  m) und eines verlängerten GMS (MS „Neuburg“,  $135$  m x  $11,4$  m x  $2,8$  m) nach FANKAN wurde ein Ansatz abgeleitet, mit dem unter Vernachlässigung des nachgewiesenen, für praktische Belange jedoch unbedeutenden Schiffslängeneinflusses die Quantifizierung der squatbedingten Verminderungen der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit  $V_{gr}$  bezogen auf die theoretische untere kritische Schiffsgeschwindigkeit  $V_{kr}$  im Regel-T-Profil möglich ist. Bei der noch zulässigen Flottwassertiefe  $h-T = 0,2$  m müssen danach Reduzierungen der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit auf  $V_{gr} = 0,75 V_{kr}$  bis an die untere Grenze der fahrdynamisch zur Gewährleistung der Sicherheit der Schifffahrt erforderlichen Manövriergeschwindigkeit hingenommen werden.

Da das Tiefgangsverhältnis der maßgebende Einflussfaktor für das dynamische Tauchungsverhalten ist und sich die Zuordnung des Squats zu abweichenden Kanalquerschnitts- bzw. Flachwasserbreiten bei vorgegebenen Tiefgangsverhältnis primär mit der Zuordnung zur jeweils zugehörigen kritischen Schiffsgeschwindigkeit verändert [5] [6], lassen sich aus den vorgelegten Ergebnissen auch Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Auswirkungen geringer Flottwassertiefen in anderen Wassertiefen bei der Bewertung von Ausbaukriterien ziehen.

Auf Grund der praktischen Bedeutung der Squateinflüsse auf die Schifffahrtsbedingungen – wie z. B. bei Niedrigwasserverhältnissen – sollten weitere, vertiefende Untersuchungen zu diesem Komplex durchgeführt werden.

#### Literatur

- [1] SCHUSTER, S.: Untersuchungen über Strömungs- und Widerstandsverhältnisse bei der Fahrt von Schiffen auf beschränktem Wasser. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG), 46 (1952)
- [2] KREITNER, J.: Über den Schiffswiderstand auf beschränktem Wasser. Werft-Reederei-Hafen, 15 (1934) 7
- [3] RÖMISCH, K.: Berechnungsverfahren zur praktischen Ermittlung der im Kanal durch ein fahrendes Schiff hervorgerufenen maximalen Wasserspiegelschwankungen. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, 23 (1969)
- [4] BAW: Einfluß stärker motorisierter und längerer Schiffe auf die Sohlenerosion des Rheins. Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Dezember 1997 (unveröffentlicht)

- [5] RÖMISCH, K.: Erreichbare Fahrgeschwindigkeit und Tauchung eines Schiffes auf flachem Wasser – ein Beitrag zur optimalen Bemessung von Binnen- und Seewasserstraßen. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, 24 (1969)
- [6] RÖMISCH, K.: Empfehlungen zur Bemessung von Hafeneinfahrten. Mitteilungen, TU Dresden, Hubert-Engels-Labor, 1 (1989)
- [7] PAGEL, W.; FUEHRER, M.: Schiffsumströmung und Widerstandsverhalten völliger Schiffe bei Kanalfahrt – Ergebnisse einer diskreten Modellierung und ihrer experimentellen Verifizierung. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin; Schriftenreihe Binnenschifffahrt, 3 (1989)
- [8] FUEHRER, M.; PAGEL, W.: Modellierung the backwash current and the resistance behaviour of full ships during a canal run, basing upon the fluid automata networks. 27<sup>th</sup> International Navigation Congress, Paper S. 1–3; Osaka 1990
- [9] BAW: Gutachten zur Bemessung von Ausbauquerschnitten für den Richtungsverkehr (Abschlussbericht). Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Dezember 1999 (unveröffentlicht)
- [10] RÖMISCH, K.: Hydromechanische Effekte fahrender Schiffe in Binnenkanälen. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 70 (1990)
- [11] WANDEL, R.: Squat – eine Bestandsaufnahme. Schiff und Hafen, 51 (1999)7
- [12] FUEHRER, M.: Wechselwirkung zwischen Schiff und beschränktem Fahrwasser – Konzipierung des F/E-Gebietes Hydraulische Erscheinungen bei der Kanalfahrt von Schiffen. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin; Schriftenreihe Wasser und Grundbau, 49 (1985)
- [13] BMV: Richtlinie für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen. Ausgabe 1994 BW 23/ BW 24/ BW 28/ 52.05.00